

Matheus Felipe Marcon

**APROVEITAMENTO DA AREIA DE FUNDIÇÃO COMO
AGREGADO MIÚDO FINO EM CONCRETOS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto
Prudêncio Júnior

Coorientadora: Eng.^a Civil Msc.
Rudiele Aparecida Schankoski

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa
de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Marcon, Matheus Felipe Marcon

Aproveitamento da areia de fundição como agregado miúdo
fino em concretos / Matheus Felipe Marcon Marcon ;
orientador, Luiz Roberto Prudêncio Jr. Prudêncio Jr. ; co-
orientadora, Rudiele Aparecida Schankoski Schankoski. -
Florianópolis, SC, 2013.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. areia de fundição. 3. concreto
seco. 4. concreto plástico. I. Prudêncio Jr., Luiz Roberto
Prudêncio Jr.. II. Schankoski, Rudiele Aparecida
Schankoski. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Matheus Felipe Marcon

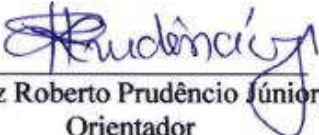
APROVEITAMENTO DA AREIA DE FUNDIÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO FINO EM CONCRETOS

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

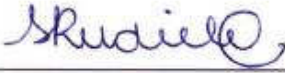
Florianópolis, 29 de novembro de 2013.

Prof. Luiz Alberto Gómez, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



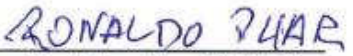
Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Rudiele Aparecida Schankoski, Eng.^a Civil Msc.
Coorientadora
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.ª Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina



Ronaldo Pilar, Eng. Civil Msc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus
queridos pais, Sérgio e Vera, ao meu
irmão, André, e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas que colaboraram para o desenvolvimento desse trabalho, tanto diretamente quanto indiretamente.

Primeiramente, ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr. por ter confiado esse trabalho a mim, pela sua orientação, amizade, paciência, disposição para tirar dúvidas e, principalmente, por ter proporcionado os melhores anos que vivenciei durante a graduação, ao me acolher na família GTec.

Aos meus pais, Sérgio e Vera, e ao meu irmão, André, pelo apoio, encorajamento e por nunca terem deixado com que eu desviasse o foco do trabalho. Eu sei que as cobranças são feitas para o meu bem.

À minha coorientadora, Rudiele Aparecida Schankoski, e ao seu noivo, Ronaldo Pilar, pelos ensinamentos fundamentais, pelo apoio de sempre, pela amizade e pelo acompanhamento de perto de todas as etapas do trabalho. Vocês foram indispensáveis.

Aos meus colegas e amigos do GTec, Paulo, Eduardo e Felipe, que ajudaram muito na realização das atividades experimentais desse trabalho e sempre promoveram dias e noites de trabalho divertidos. À Regina, à Paula, ao Lucas e ao Stocco, pela amizade e incentivo, e por sempre estarem dispostos a ajudar. Aos “calouros” do GTec, por terem auxiliado no fim do programa experimental.

Aos meus amigos tanto de Joinville quanto de Florianópolis, por sempre estarem juntos comigo em momentos de diversão e descontração.

Ao engenheiro Denis, pela amizade e pelo aprendizado proporcionado durante os anos que fui bolsista do GTec/RheoSet.

À professora Janaíde, por aceitar avaliar este trabalho e também ao Júlio e à Caroline, pelo auxílio concedido na realização dos últimos ensaios.

À empresa WEG, pelo apoio e incentivo a essa pesquisa.

Finalmente, a Deus, por ter concedido a família perfeita para mim, amigas verdadeiras e duradouras, uma educação de muita qualidade, enfim, a vida que eu sempre quis.

Muito obrigado!

RESUMO

No Brasil, são gerados anualmente mais de três milhões de toneladas de areias de fundição, representando atualmente um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Entretanto, muito pouco desse material é reaproveitado. Uma vez que esse material se trata de um passivo ambiental, potencialmente poluidor do solo e das águas superficiais e subterrâneas, busca-se um emprego alternativo para o mesmo. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho da areia de fundição como agregado miúdo fino para a produção de blocos de concreto em fábricas de pré-moldados e, também, em substituição a areias finas empregadas em usinas de concreto. Para emprego em misturas plásticas, foram dosadas três argamassas, utilizando diferentes teores de areia de fundição (0, 50 e 100%) em substituição à areia natural. A análise dos resultados baseou-se na demanda de água das misturas, tempo de pega, expansibilidade e resistência à compressão. Também foi estudada a areia de fundição após ser submetida a um aquecimento em forno elétrico a 900°C, com a finalidade de avaliar a possível variação da demanda de água e resistência à compressão das misturas. Para emprego em concretos secos, foram dosadas misturas com três traços distintos, cada um deles com 0, 50 e 100% de substituição de areia natural fina por areia de fundição. Para cada mistura foram moldados corpos de prova com duas massas específicas previamente determinadas (2,20 e 2,25 kg/dm³), visando à fabricação de pré-moldados com diferentes compacidades. A análise dos resultados baseou-se na resistência à compressão dos concretos secos. Os resultados desse trabalho mostraram que o emprego da areia de fundição em concreto plástico não é recomendado sem um prévio tratamento térmico, por aumentar significativamente a demanda de água e por reduzir consideravelmente a resistência à compressão das argamassas, para a mesma relação água/cimento. Por outro lado, os resultados obtidos com o uso da areia de fundição submetida ao tratamento térmico a 900°C foram satisfatórios: a resistência à compressão não foi afetada pela presença da areia de fundição e a demanda de água não sofreu um aumento tão significativo, a ponto de tornar inviável a utilização desse resíduo. Em concreto seco, a presença da areia de fundição não causou variação significativa na resistência mecânica para fabricação de blocos de até 6 MPa. No entanto, para resistências superiores, observou-se um decréscimo da resistência concomitante com o aumento do teor de areia de fundição.

Palavra-Chave: areia de fundição, concreto seco, concreto plástico.

ABSTRACT

In Brazil, over three million tons of foundry sands are generated annually, currently representing one of industrial solid wastes with higher production volume. However, a very low quantity of this material is reused in other processes. Since this material can cause environmental damages, such as pollution of soil, surface water and groundwater, this study searches for an alternative use for it. Therefore, this research aimed to evaluate the performance of foundry sand used as fine aggregate to produce concrete blocks in pre-cast factories, as well as replacing the fine sand used in Ready Mix Concrete Plants. For use in conventional concrete, three mixtures were produced using different compositions of foundry sand (0, 50 and 100%) in replacement of natural sand. The performance analysis was based on water demand, initial setting time, compressive strength and expansion of the mixtures. Studies were also carried out with the foundry sand after being subjected to a thermal treatment at 900°C, in order to evaluate the possible variations of water demand and compressive strength of the mixtures. For use in dry concrete, mixtures were prepared with three different proportions, each with 0, 50 and 100% replacement of natural sand with fine foundry sand. Test specimens with two densities previously stipulated (2.20 and 2.25 kg / dm³) were cast for each mixture, aiming to represent the concrete generally used in Concrete Block Plants. The performance analysis was based on the compressive strength of dry concretes specimens. The results of this study showed that the use of foundry sand in plastic concrete is not recommended without being subjected to a previous heat treatment, due to a significant increase of water demand. Furthermore, for the same water / cement ratio, the compressive strength of the mortars with partial substitution of foundry sand was 16% lower than that of the reference (0% foundry sand), and the total substitution led to a reduction of 56%. On the other hand, the results obtained using the foundry sand subjected to heat treatment were satisfactory: the compressive strength was not affected by the presence of foundry sand and water demand has not suffered such a significant increase to the point of becoming infeasible to use this waste material. The studied foundry sand in dry concrete caused no significant variation in the mechanical resistance for the production of blocks with compressive strength up to 6 MPa. However, for higher resistances, there was a concomitant decrease in resistance with increasing percentage of foundry sand.

Keywords: foundry sand, dry concrete, ordinary concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da fundição em molde de areia.	28
Figura 2 - Areia de fundição à base de bentonita.	29
Figura 3 - Depósito de areia de fundição.....	30
Figura 4 - Abatimento em função do teor de areia de fundição.	39
Figura 5 – Curva Granulométrica da areia natural.	41
Figura 6 - Curva granulométrica da areia de britagem.	42
Figura 7 - Curva granulométrica da Brita 0.....	43
Figura 8 - Curva granulométrica da areia de fundição.	46
Figura 9 - Moldes de corpos de prova prismáticos.....	47
Figura 10 - Corpos de prova 5x10cm recém moldados.....	48
Figura 11 - Ensaio Flow Table test.	49
Figura 12 - Areia de fundição queimada.	51
Figura 13 - Consistência adequada do concreto seco.....	52
Figura 14 - Produção dos blocos de concreto.....	54
Figura 15 - Índices de consistência das argamassas.....	55
Figura 16 - Curva de evolução de temperatura das argamassas.	56
Figura 17 - Variações volumétricas das argamassas de referência.....	58
Figura 18 - Variações volumétricas das argamassas contendo areia de fundição.....	58
Figura 19 - Índices de consistência das argamassas.....	59
Figura 20 - Resistências à compressão aos 28 dias dos concretos secos.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas da areia descartada de fundição (ADF).....	32
Tabela 2 - Percentual de ADF utilizada nas misturas dos concretos em estudo.	38
Tabela 3 - Características físicas e químicas dos cimentos empregados.	43
Tabela 4 - Contaminantes determinados através do ensaio de lixiviação.	45
Tabela 5 - Caracterização da areia de fundição.....	45
Tabela 6 - Estimativa de tempo de pega das argamassas.	56
Tabela 7 - Resistências à compressão das argamassas.	57
Tabela 8 - Resistências à compressão das argamassas.	60
Tabela 9 - Resistências à compressão aos 28 dias, em MPa.	60
Tabela 10 - Resistência à compressão dos "Blocos Comuns" aos 28 dias de idade.	62
Tabela 11 - Resistência à compressão dos "Blocos Alterados" aos 28 dias de idade.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 JUSTIFICATIVA DAS APLICAÇÕES ESTUDADAS DA AREIA DE FUNDIÇÃO	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos.....	22
2 AGREGADO	25
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	25
2.1.1 Massa Específica Aparente.....	25
2.1.2 Massa Unitária.....	25
2.1.3 Análise Granulométrica	25
2.1.4 Módulo de Finura.....	26
2.1.5 Substâncias Deletérias no Agregado	26
2.2 AREIA DE FUNDIÇÃO	27
2.2.1 O processo de fundição	27
2.2.2 Aspectos ambientais relacionados à geração de resíduos sólidos	29
2.2.3 Deposição da areia de fundição	30
2.2.4 Lixiviação	31
3. CONCRETO.....	33
3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	33
3.2 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO	34
3.3 TEMPO DE PEGA DO CONCRETO	34
3.3 VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CONCRETO.....	35
4 UTILIZAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM CONCRETO .	37

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	37
4.2 TRABALHABILIDADE	38
5 MATERIAIS E METODOLOGIA	41
5.1 MATERIAIS.....	41
5.1.1 Caracterização dos Materiais de Referência	41
5.1.1.1 Areia Natural.....	41
5.1.1.2 Areia de Britagem	42
5.1.1.3 Brita 0.....	42
5.1.1.4 Cimentos	43
5.1.2 Caracterização Preliminar da Areia de Fundição.....	44
5.2 METODOLOGIA	46
5.2.1 Emprego da Areia de Fundição em Concretos Plásticos	46
5.2.1.1 Moldagem dos Corpos de Prova Prismáticos.....	47
5.2.1.2 Moldagem dos Corpos de Prova Cilíndricos.....	47
5.2.1.3 Ensaios	48
5.2.1.4 Testes em Escala Industrial: Produção de Concreto Plástico.....	50
5.2.1.5 Testes com Areia de Fundição Queimada.....	50
5.2.2 Emprego da Areia de Fundição em Concretos Secos para a Produção de Blocos	52
5.2.2.1 Moldagem dos Corpos de Prova em Concreto Seco	53
5.2.2.2 Testes em Escala Industrial: Produção e Classificação dos Blocos de Concreto.....	53
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1 ARGAMASSAS PLÁSTICAS PARA EMPREGO EM CONCRETO PLÁSTICO	55

6.2 EMPREGO EM CONCRETOS SECOS PARA A PRODUÇÃO DE BLOCOS.....	60
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável é um dos temas mais abordados atualmente por diversos pesquisadores e instituições de pesquisa da área da construção civil. À medida que os impactos ambientais tornam-se mais agravantes e em maior escala em virtude do avanço tecnológico e do desenvolvimento urbano, os órgãos responsáveis pela integridade do meio ambiente buscam alternativas e soluções para minimizar os efeitos prejudiciais causados ao mesmo.

Tendo em vista o crescente interesse da sociedade em mitigar os danos provocados ao meio ambiente, esse trabalho tem como fundamento propor um destino adequado e viável, economicamente e tecnicamente, para um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção no Brasil: a areia de fundição (ABIFA, 2012). Anualmente, são geradas mais de três milhões de toneladas desse resíduo e grande parte desta produção é destinada a aterros industriais, enquanto muito pouco desse material é reaproveitado em outros processos (ABIFA, 2012).

Não obstante da situação nacional, a produção média de areia de fundição pela WEG, Guaramirim – SC, é cerca de 1.240 toneladas por mês. Isso resulta na deposição dessa areia em aterros, o que contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, já que o material torna-se potencialmente poluidor do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

1.1 JUSTIFICATIVA DAS APLICAÇÕES ESTUDADAS DA AREIA DE FUNDIÇÃO

Com a quantificação de produção média de artefatos de algumas empresas da região e com a produção mensal da areia de fundição pela WEG, é possível identificar aplicações plausíveis para esse material, tais como: agregado miúdo fino para produção de blocos de concreto em fábricas de pré-moldados e, também, em substituição a areias finas empregadas em usinas de concreto. As areias finas empregadas atualmente nessas empresas são oriundas de cava ou de duna e possuem módulo de finura em torno de 1,0. Como a areia de fundição apresenta granulometria bastante fina, esse material pode ser um potencial substituto da areia natural atualmente empregada.

Cada m³ de concreto plástico convencional emprega, em média, 250 kg de areia fina. Considerando essa única aplicação, com o total de areia fina disponibilizada pela WEG mensalmente, poder-se-ia dosar

cerca de 5 mil m³ de concreto. Esse consumo é facilmente alcançado por usinas de concreto de porte médio da região da grande Florianópolis/SC, que costumemente comercializam cerca de 8 mil m³ de concreto ao mês chegando a um total de 60 mil m³ comercializados nessa região metropolitana. Acredita-se que na região norte do estado de Santa Catarina (Joinville/Jaraguá do Sul) esta produção passe dos 30 mil m³.

O emprego da areia de fundição para concretos secos, utilizados em fábricas de pré-moldados para pavers e blocos, consiste em outra possibilidade. É necessário, em média, 10 kg de areia para produção de um bloco de concreto (6 MPa); destes, 5 kg são de areia fina. Considerando a produção de 1240 toneladas/mês de areia de fundição, esse material seria suficiente para a fabricação de 250 mil blocos/mês, ou cerca de 8 mil blocos/dia em empresas com funcionamento ininterrupto (incluindo finais de semana). Máquinas para produção de blocos de concreto da marca Piorotti, por exemplo, produzem cerca de mil blocos por hora. Portanto, a quantidade estipulada diariamente (8 mil blocos) seria alcançada.

Diante dos números expostos, percebe-se que é viável a comercialização do material, tanto em concretos plásticos (centrais de concreto) quanto em fábricas de pré-moldados para a produção de blocos. Essas destinações podem não somente diminuir o custo com a disposição do resíduo em aterros industriais, mas também agregar valor a esses resíduos da indústria.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho da areia de fundição como agregado miúdo fino em misturas de concretos secos para a produção de blocos de concreto em fábricas de pré-moldados e, também, em substituição a areias finas em misturas de concretos plásticos, empregadas em centrais de concreto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização da areia de fundição;
- Avaliação do desempenho em concretos secos;

- Avaliação do desempenho em concretos plásticos;
- Aplicação da areia de fundição em fábrica de blocos de concreto e comparação dos resultados com os obtidos em laboratório;
- Classificação da areia de fundição como resíduo sólido;

2 AGREGADO

Agregado é um material inerte granular utilizado com um meio cimentício para a produção de argamassa ou concreto. A qualidade do agregado para a confecção de um concreto é fundamental, pois influencia na resistência, durabilidade e desempenho estrutural do conjunto. Além disso, é muito importante do ponto de vista econômico, devido ao seu reduzido custo em relação ao cimento, e também do ponto de vista técnico, ao conferir maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

2.1.1 Massa Específica Aparente

Segundo Neville (1997), a massa específica aparente de um agregado se refere à relação entre a massa do agregado seco em estufa a uma temperatura entre 100°C e 110°C e o volume ocupado pelo mesmo considerando os poros impermeáveis, mas não incluindo os poros capilares. A determinação da massa específica aparente de um agregado pode ser realizada por meio do método do picnômetro, descrito na ABNT NBR 6508:1994.

2.1.2 Massa Unitária

A massa unitária de um agregado é utilizada quando é necessária a sua quantificação em volume. É definida como a relação entre a massa do agregado seco e o volume de um recipiente que o contém, ou seja, envolve o volume aparente dos grãos e o volume dos vazios intergranulares (NEVILLE, 1997). O procedimento para determinação da massa unitária de um agregado é exposto na ABNT NBR NM 45:2006.

2.1.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste na operação de separação das partículas constituintes de mesmo tamanho de uma amostra de agregado. Essa separação é realizada através de peneiras com aberturas padronizadas, correspondentes às séries normal e intermediária. A amostra de agregado é submetida ao peneiramento em peneiras de

aberturas sucessivamente menores e, dessa forma, é separado em frações de partículas entre determinadas faixas de tamanho (NEVILLE, 1997). O procedimento é descrito pela ABNT NBR NM 248:2003 e as aberturas das peneiras utilizadas no ensaio são apresentadas na NBR 7211:2005.

2.1.4 Módulo de Finura

O módulo de finura é um número que representa o tamanho médio ponderado de uma peneira onde o material é retido. Seu valor é obtido a partir da soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividida por cem. Logo, quanto mais grosso é o agregado, maior será o seu módulo de finura (NEVILLE, 1997).

2.1.5 Substâncias Deletérias no Agregado

De acordo com Neville (1997), três categorias de substâncias podem interferir negativamente na confecção de concretos e argamassas: impurezas orgânicas, torrões de argila e partículas não sãs.

- **Impurezas orgânicas:** A matéria orgânica encontrada nos agregados pode interferir nas reações químicas de hidratação do cimento. Essas impurezas são provenientes da decomposição de detritos de origem vegetal e se apresentam na forma de húmus e argila orgânica.
- **Torrões de argila:** A argila pode influenciar na aderência entre o agregado e a pasta de cimento, sob a forma de películas superficiais. Essa diminuição de aderência pode resultar na redução da resistência e da durabilidade do concreto. Além disso, alguns tipos de argila podem apresentar comportamento expansivo. Sob forma de torrões, constituem-se em pontos de fraqueza que comprometem a resistência do concreto.
- **Partículas não sãs:** Materiais que apresentam massa específica baixa podem ser considerados deletérios, assim como a inclusão de materiais moles como torrões de argila e carvão. Esses agentes podem comprometer a resistência do concreto se utilizados em teores superiores a 5% da massa do agregado, e, mesmo em baixos teores, podem resultar em falhas. O carvão é um material mole e pode causar a desagregação do concreto devido ao seu potencial de expansibilidade. Além disso, se a

presença de materiais carbonosos ocorrer em grande quantidade, existe a possibilidade da hidratação da pasta de cimento ser perturbada.

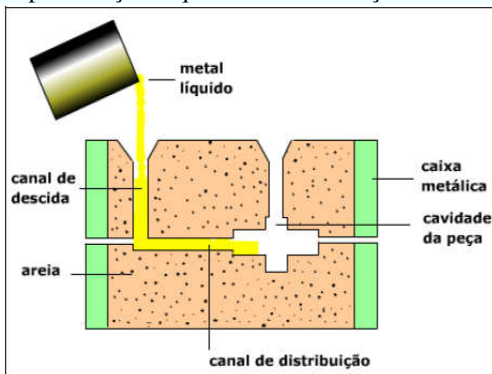
2.2 AREIA DE FUNDIÇÃO

Areia de fundição é um subproduto da indústria de fundição de materiais ferrosos e não ferrosos. Essas indústrias utilizam areia de sílica na confecção de moldes, machos e núcleos para a fabricação de peças de metal, e, durante esse processo, tal areia é reciclada e reutilizada várias vezes. Quando a areia degradada chega a um estágio inservível para o processo de fundição, ela é descartada e passa a se chamar “areia de fundição” (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

2.2.1 O processo de fundição

As características físicas e químicas da areia de fundição dependem do tipo de processo de fundição a que são anteriormente submetidas (SIDDIQUE; SINGH, 2011). Segundo Matos e Schalch (1997), o processo de moldagem é iniciado com o preparo da areia de moldagem, constituída de areia-base, areia residual reciclada e aditivos, que são homogeneizados em um misturador. A areia de moldagem procede para a etapa de preparação dos moldes, etapa também em que são colocados os machos, peças geralmente compostas pelos mesmos materiais dos moldes, utilizadas para produzir furos, reentrâncias e cavidades na peça metálica a ser criada. Após a confecção dos moldes e machos, ocorre a fusão do metal e preenchimento dos moldes a partir do vazamento do metal fundido, conforme a Figura 1. Finalmente, desmolda-se e realizam-se os acabamentos da peça fundida.

Figura 1 - Representação esquemática da fundição em molde de areia.



Fonte: Centro de Informação Metal Mecânica (2013).

A areia residual do processo de fundição pode ser reutilizada, compondo a areia de moldagem em conjunto com os outros insumos. Após vários ciclos de reutilização da areia residual, essa areia começa a apresentar um acúmulo de materiais contaminantes que podem interferir na qualidade dos moldes, como restos de resinas e argilas, carvão e outros aditivos degradados no processo de vazamento do metal fundido, em decorrência das altas temperaturas. Por isso, é necessária a composição da areia residual com uma parcela de areia nova, para reduzir o teor de contaminação da areia de moldagem. Essa prática induz a geração de um excedente de areia residual, que não será utilizada para compor a areia de moldagem, uma vez que foi substituída pela areia nova. Esse excedente é descartado e passa a ser chamado de “areia de fundição” (ABIFA, 1999; THOMAS, 1996; KNOP & SHCHEIB, 1979 apud PEIXOTO, 2006).

Conforme Siddique e Singh (2011), existem duas classificações para a areia de moldagem que interferem no processo de fundição, relacionadas ao tipo de sistema aglutinante utilizado. Os dois tipos de areia de moldagem são: à base de bentonita (areia verde) e à base de aglutinantes químicos.

A “areia verde”, que é o tipo mais econômico, rápido e, consequentemente, mais utilizado, é composta por materiais que são encontrados na natureza: areia de sílica (85 a 95%), bentonita (4 a 10%) como aglutinante, carvão pulverizado (2 a 10%) como aditivo, para aperfeiçoar o acabamento da superfície da peça metálica prevenindo a fusão da areia à mesma e água (2 a 5%) para a obtenção de plasticidade.

Em decorrência da presença de materiais de origem orgânica, a “areia verde” apresenta uma coloração escura, como exposta na Figura 2.

Figura 2 - Areia de fundição à base de bentonita.



Já a areia de moldagem à base de aglutinantes químicos, apresenta areia de sílica (93 a 99%) e, geralmente, resinas fenólicas ou furânicas como aglutinante (1 a 3%). Essas areias são utilizadas na confecção de núcleos em função da elevada resistência apresentada para suportar ambientes sob altas temperaturas, e na confecção de moldes. Essa areia apresenta coloração mais clara e textura mais leve que a “areia verde” (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

2.2.2 Aspectos ambientais relacionados à geração de resíduos sólidos

De acordo com dados da ABIFA (2012), as areias de fundição representam atualmente um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção no Brasil.

Segundo a ABNT NBR 10004:2004, esses resíduos podem ser classificados como perigosos ou não perigosos, dependendo do processo que lhes deu origem e das características apresentadas quanto à inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Geralmente, as areias que utilizam resinas fenólicas como aglutinante se enquadram na classificação de resíduos perigosos (Classe I) por oferecerem periculosidade ao meio ambiente e à saúde pública, pois apresentam concentrações de fenóis superiores ao limite estabelecido pela mesma norma. A concentração dos contaminantes possivelmente presentes nas areias é um parâmetro que pode ser

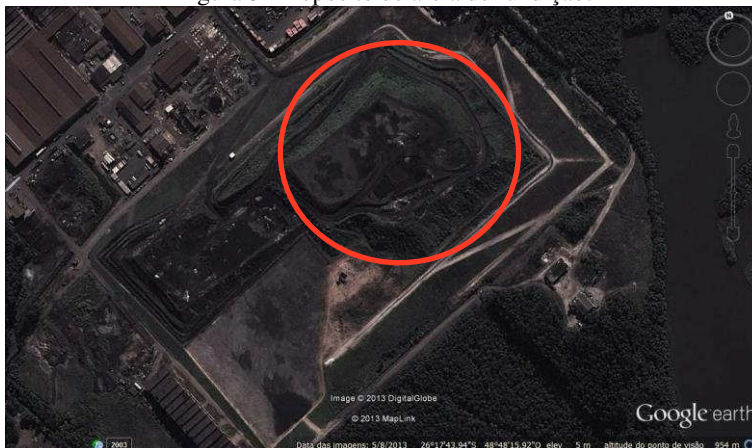
determinado através do ensaio de lixiviação prescrito na ABNT NBR 10005:2004.

Já as areias que utilizam bentonita como aglutinante, podem ser classificadas como resíduos não-perigosos (Classe II), inertes (Classe IIB) ou não-inertes (Classe IIA), dependendo das concentrações em que são solubilizados os seus constituintes. O ensaio de solubilização deve ser realizado seguindo os procedimentos expostos pela ABNT NBR 10006:2004 e seus resultados devem ser comparados com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2004 para a classificação do resíduo como inerte ou não-inerte.

2.2.3 Deposição da areia de fundição

A areia de fundição é um resíduo sólido cuja deposição inadequada pode acarretar sérios problemas ambientais. Na Figura 3 pode ser visualizado um depósito de areia de fundição de uma indústria localizada na região de Joinville, Santa Catarina.

Figura 3 - Depósito de areia de fundição.



Fonte: Google Earth (2013)

Segundo a CETESB (2007), os procedimentos para gerenciamento de areia de fundição são imprescindíveis para assegurar a efetiva proteção ao meio ambiente e à saúde pública, visto que esse resíduo é um potencial contaminador do solo e água subterrânea. Tais procedimentos propõem as seguintes adequações: dos depósitos existentes de areia de fundição, das operações das empresas geradoras

do resíduo e da empresa destinatária. Cabe salientar que, antes de qualquer medida de deposição da areia de fundição, são de grande importância ações com a finalidade de minimizar o volume do resíduo gerado, por meio da implementação de práticas de recuperação da areia de fundição.

2.2.4 Lixiviação

Lixívia é o nome dado ao líquido que contém substâncias provenientes da solubilização de elementos sólidos de um aterro sanitário, podendo conter, sobretudo, elementos em suspensão. Tal líquido varia significativamente sua composição em função da idade e do tipo de aterro (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010).

Segundo Siddique et al. (2010), a formação de lixívia se deve principalmente à precipitação, que percola através de depósitos de resíduos em um aterro sanitário. Uma vez que a água oriunda da precipitação entra em contato com resíduos sólidos em decomposição, ela se torna contaminada e pode fluir para fora do depósito, sendo assim nomeada de lixívia.

A composição desse líquido pode ser determinada como uma mistura de água e quatro grupos de contaminantes: matéria orgânica dissolvida, macro componentes inorgânicos, metais pesados e compostos orgânicos xenobióticos (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010).

Ji et al. (2001) estudaram a composição de diferentes amostras de areia de fundição e suas características relacionadas à lixiviação, de acordo com o método holandês NEN7343. O método consiste em fluir água, vagarosamente, através das amostras de areia, para um recipiente de volume conhecido. Posteriormente, mede-se a concentração dos elementos lixiviados presentes no líquido passante.

Ji et al. (2001) concluíram que todas as amostras de areia de fundição estudadas continham hidrocarbonetos poliaromáticos, sendo que o mais importante era o naftaleno. Além disso, as “areias verdes” apresentaram quantidade de hidrocarbonetos poliaromáticos muito maior que as areias à base de aglutinantes químicos. Os metais pesados se apresentaram em quantidades muito reduzidas. Com exceção nas areias de fundição que não continham aditivos orgânicos. As areias sem aditivos orgânicos continham elevadas concentrações de cobre, zinco e, principalmente, chumbo.

Já Maccagnan et al. (2013), estudaram a incorporação de areia de fundição na fabricação de blocos de concreto. A areia de fundição de

estudo continha bentonita como aglutinante e foi classificada como resíduo não perigoso e não-inerte (Classe II-A, segundo a ABNT NBR 10004:2004). Foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização seguindo os procedimentos das normas brasileiras vigentes, ABNT NBR 10005:2004 e ABNT NBR 10006:2004, cujos resultados estão expostos na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 - Características químicas da areia descartada de fundição (ADF)

Compostos (Lixiviação - NBR 10005)	Teor (mg/L)	Limite (mg/L)
Arsênio	<0,0015	1,0
Cádmio	<0,005	0,5
Chumbo	<0,005	1,0
Cromo total	<0,003	5,0
Mercúrio	<0,00005	0,1
Fluoreto	zero	150
Compostos (Solubilização - NBR 10006)	Teor (mg/L)	Limite (mg/L)
Alumínio	305,27	0,2
Cádmio	<0,005	0,005
Chumbo	<0,005	0,01
Cromo Total	0,283	0,05
Ferro	65,67	0,3
Mercúrio	<0,00005	0,001
Fenol	0,015	0,01
Sulfato	239,96	250
Cloreto	222,64	250
Fluoreto	zero	1,5

Fonte: Maccagnan et al. (2013).

Os riscos da geração de lixívia podem ser significativamente reduzidos com o dimensionamento e construção adequados de aterros eficientes para a deposição de resíduos, utilizando artifícios como: materiais impermeáveis de origem geológica, mantas geotêxteis ou camadas impermeáveis de material argiloso (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010).

3. CONCRETO

De acordo com Isaia (2005), o concreto representa o segundo material mais consumido pela humanidade, por possuir propriedades adequadas e versatilidade que proporcionam o seu extensivo uso em diversos tipos de construção. Tais qualidades, aliadas ao seu baixo custo, fazem do concreto um material com vantagens técnicas, econômicas e sociais difíceis de serem superadas por qualquer outro material.

Nos últimos anos, a variedade de materiais que podem participar da constituição do concreto tornou-se mais ampla. Diversas técnicas executivas e composições de traços são conhecidas, mas devem ser devidamente estudadas para que suas aplicações sejam adequadas em termos técnicos, econômicos e sociais, atentando-se ao bom uso de recursos finitos e à redução da poluição (ISAIA, 2005).

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência à compressão é considerada a propriedade mecânica mais importante do concreto, já que essa é a principal solicitação a qual deverá resistir nas estruturas que compõe. Além disso, é utilizada com um índice para todos os outros tipos de resistência.

Essa propriedade do concreto no estado endurecido é definida como a tensão limite que a peça pode suportar, sofrendo a ruptura se for submetida além desse valor de tensão. Diferentemente do ensaio de tração, no ensaio de compressão o corpo de prova de concreto pode ser considerado rompido mesmo não apresentando fratura externa. Isso porque o concreto possui pequenas fissuras internas mesmo antes de ser submetido a solicitações externas. Quando a solicitação externa alcançar a carga de ruptura à compressão do concreto, tais fissuras internas terão atingido um estado tão avançado que tornam-se insustentáveis pelo corpo-de-prova de concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A resistência à compressão do concreto é calculada de acordo com a Equação 1:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

f_c – resistência à compressão (kN/cm²);
F – carga máxima aplicada (kN);
A – área da seção do corpo-de-prova (cm²).

3.2 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

Trabalhabilidade é uma característica do concreto no estado fresco difícil de mensurar quantitativamente, pois está relacionada às condições operacionais do concreto em questão. Um concreto pode apresentar trabalhabilidade adequada para um tipo de construção, mas não para outra que emprega diferentes técnicas de transporte, lançamento e adensamento (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Duas propriedades do concreto estão envolvidas quando se trata do termo trabalhabilidade: consistência e coesão.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a consistência é a propriedade relacionada à umidade da mistura de concreto e a sua mobilidade, sendo que é geralmente determinada por meio do ensaio de abatimento. Devido à facilidade de realização do ensaio de abatimento e seu resultado quantitativo, é plausível a adoção dessa medida como um índice aproximado da trabalhabilidade.

A coesão de uma mistura de concreto se refere à capacidade de resistir à segregação durante o processo de adensamento. Essa propriedade é regida principalmente pela quantidade de materiais finos presente na mistura e pela proporção relativa entre agregados miúdo e graúdo (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

3.3 TEMPO DE PEGA DO CONCRETO

A pega do concreto é definida como o início da solidificação em uma mistura fresca de concreto, proveniente das reações de hidratação do cimento. O tempo de início de pega e o tempo de fim de pega são pontos arbitrariamente definidos por um método de ensaio, e representam, respectivamente, o momento em que não se consegue mais manusear adequadamente a mistura de concreto e o momento em que a mistura de concreto passa a desenvolver a sua resistência mecânica a uma taxa acentuada (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os fatores que mais influenciam os tempos de pega do concreto são: composição do cimento, relação água/cimento, temperatura e aditivos. Em grande parte dos casos, cimentos mais finos apresentam tempos de pega menores, relações água/cimento maiores apresentam maiores tempos de pega, maiores temperaturas diminuem os tempos de

pega e aditivos reguladores de pega podem aumentar ou diminuir os tempos de pega, dependendo de sua função e eficácia (GUIMARÃES, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

3.3 VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CONCRETO

As variações volumétricas do concreto estão diretamente relacionadas ao deslocamento da água que compõe esse material, desde o estado fresco até idades mais avançadas (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

De acordo com Neville (1997) e Mehta e Monteiro (2008), as variações volumétricas sofrem influência principalmente das características físicas do ambiente em que o concreto se encontra e da composição de seu traço.

As reduções de volume apresentadas pelo concreto são oriundas de diferentes tipos de retração: retração plástica, retração autógena, retração por secagem e retração térmica (HASPARYK et al., 2005).

- **Retração Plástica:** No estado fresco, a exposição da superfície de uma estrutura de concreto ao ambiente pode ocasionar a perda de água constituinte do material. Essa perda de água, que pode ser atribuída à baixa umidade relativa ou ao aumento da temperatura ambiente, provocará a redução de volume do concreto, podendo levá-lo à fissuração (HASPARYK et al., 2005).
- **Retração Autógena:** Após o início de pega do concreto, a remoção de água dos poros capilares em decorrência da hidratação das partículas de cimento provoca redução volumétrica sem que ocorra a retirada de nenhum de seus materiais constituintes. Em concretos com baixa relação água/cimento, esse tipo de retração é mais expressivo (NEVILLE, 1997; HASPARYK et al., 2005).
- **Retração por Secagem:** Quando o concreto é exposto a umidades ambientes abaixo do ponto de saturação, ocorre a perda de água fisicamente adsorvida do C-S-H (silicato de cálcio hidratado, produto da hidratação do cimento), e, conseqüentemente, diminuição irreversível do volume do concreto. O gradiente de umidade é responsável também por variações volumétricas reversíveis no concreto, através da entrada e saída de água dos poros capilares decorrente da

exposição alternada a condições secas e úmidas (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

- **Retração Térmica:** A deformação relacionada à retração térmica depende do coeficiente de dilatação do concreto e de como a variação de temperatura do mesmo se desenvolve. As estruturas de concreto sofrem pouco dano com as alterações da temperatura ambiente, desde que não sejam expostas a condições extremas. Para estruturas massivas, o calor de hidratação do cimento aliado a condições de baixa dissipação resultam em altas temperaturas apresentadas pelas peças de concreto poucos dias após o lançamento. O resfriamento posterior pode resultar na fissuração do concreto.

4 UTILIZAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM CONCRETO

Existem estudos recentes sobre o emprego de areia de fundição em concretos que visam, fundamentalmente, analisar as propriedades de resistência à compressão e trabalhabilidade das misturas elaboradas.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Siddique et al. (2009) estudaram os efeitos causados pela utilização da areia de fundição à base de bentonita sobre as propriedades mecânicas do concreto, inclusive sobre a resistência à compressão. Para isso, foram confeccionadas três misturas em concreto contendo areia de fundição em diferentes proporções (10%, 20% e 30%) e uma mistura referência, sem areia de fundição. Cabe salientar que as parcelas de areia natural da mistura referência foram substituídas em massa pela areia de fundição, o que pode contribuir para uma menor molhabilidade da mistura devido ao aumento de volume de material presente, visto que a massa específica da areia de fundição utilizada ($2,20 \text{ kg/dm}^3$) é significativamente menor do que a da areia natural ($2,68 \text{ kg/dm}^3$) e a relação água/cimento foi fixada em 0,5. Foram moldados corpos-de-prova cúbicos de 150 cm^3 ($5,31 \times 5,31 \times 5,31 \text{ cm}$) para rompimentos a 7, 28, 56, 91 e 365 dias de idade. Os resultados obtidos foram satisfatórios e demonstraram acréscimo de resistência à compressão das misturas em concreto com a inclusão de areia de fundição em relação à mistura referência. Aos 28 dias de idade, a mistura referência M-1 atingiu a resistência à compressão de 28,5 MPa, enquanto as misturas M-2 (10% de areia de fundição), M-3 (20% de areia de fundição) e M-4 (30% de areia de fundição) atingiram, respectivamente, 29,7, 30,0 e 31,3 MPa.

O aumento na resistência à compressão de misturas de concreto incorporando areia de fundição indica que esse resíduo da indústria de fundição tem potencial para ser utilizado como um substituto parcial do agregado miúdo fino na confecção de concretos (SIDDIQUE et al., 2009).

Maccagnan et al. (2013), que estudaram a incorporação de areia de fundição na fabricação de blocos de concreto, utilizaram uma areia contendo bentonita como aglutinante, que possuía massa específica aparente de $2,62 \text{ kg/dm}^3$ e módulo de finura de 1,73. Além dos ensaios de lixiviação e solubilização mencionados no item 2.2.4, foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de idade de cinco misturas de concreto. Foram feitas substituições da areia fina natural pela areia de fundição, sendo que o módulo de finura da areia

natural era de 1,38 e sua massa específica era de 2,64 kg/dm³. O traço referência possuía 24% de areia natural fina do total de agregados da mistura. Já para as quatro misturas contendo areia de fundição, foram feitas substituições de 33%, 50%, 66% e 100% em relação à quantidade total de areia natural fina do traço de referência (8%, 12%, 16% e 24% do total de materiais secos, respectivamente). Os traços das misturas de concreto podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Percentual de ADF utilizada nas misturas dos concretos em estudo.

Agregados	% de ADF na mistura em relação ao % de agregados utilizados				
	Traço 1 (REF)	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5
Areia fina	24	16	12	8	0
Areia de fundição	0	8	12	16	24
Areia industrial	43	43	43	43	43
Brita 0	33	33	33	33	33

Fonte: Maccagnan et al. (2013).

Os autores obtiveram os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade das diferentes misturas de concreto, sendo que os valores apresentados correspondem à média de seis amostras ensaiadas, para cada traço. Os valores obtidos, para os traços 1, 2, 3, 4, e 5 são, respectivamente: 13,54, 11,98, 13,69, 11,25 e 9,71 MPa.

Maccagnan et al. (2013) concluíram que a areia descartada de fundição alterou a resistência à compressão dos blocos de concreto, causando uma redução mais significativa quando utilizada em teores maiores que 16%. Entretanto, para teores até 12%, a utilização da areia de fundição torna-se viável, pois não demonstrou alterações consideráveis de resistência à compressão.

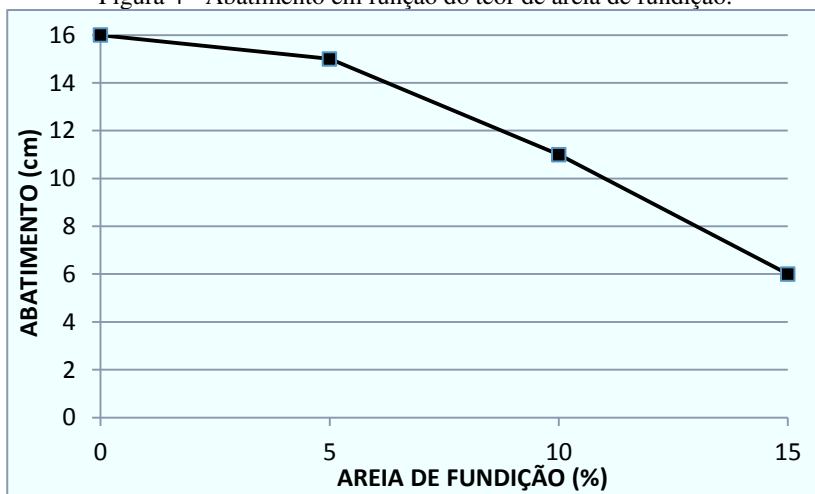
4.2 TRABALHABILIDADE

Guney et al. (2010) realizaram testes com quatro misturas em concreto, sendo que três possuíam areia de fundição em substituição à areia natural com três diferentes proporções (5, 10 e 15%) e uma era o concreto referência, sem areia de fundição. As substituições entre as areias foram feitas em massa e a relação água/cimento utilizada foi 0,45.

Os resultados obtidos pelo ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump test) mostraram que a presença da areia de fundição resultou na diminuição da fluidez e do valor do

abatimento das misturas que a continham. Os resultados estão expostos na Figura 4.

Figura 4 - Abatimento em função do teor de areia de fundição.



Fonte: Guney et al. (2010).

A diminuição da fluidez apresentada pelos concretos pode ser justificada pela presença de materiais finos argilosos na areia de fundição, visto que esse tipo de material aumenta a exigência de água de um concreto para atingir uma consistência pré-estabelecida (Guney et al., 2010). Além disso, as substituições dos materiais realizadas em massa podem ter contribuído para a redução do abatimento apontada pelos pesquisadores.

5 MATERIAIS E METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos estabelecidos anteriormente, foram necessárias as caracterizações dos materiais empregados no estudo e o desenvolvimento dos testes em laboratório, além de ensaios em escala real (em fábrica de pré-moldados), cujos resultados serão analisados posteriormente.

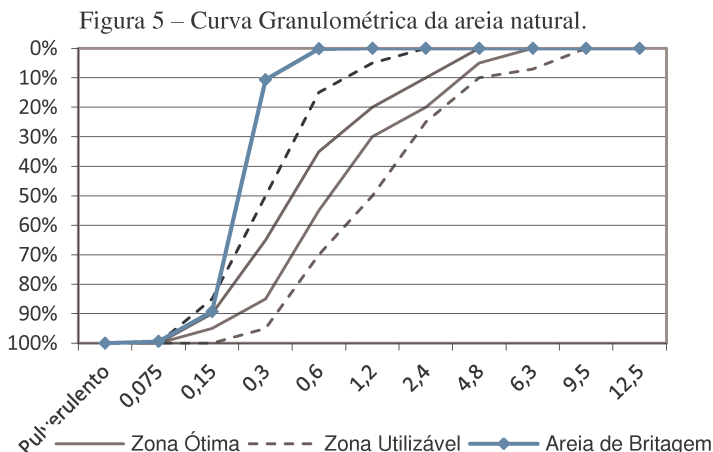
5.1 MATERIAIS

5.1.1 Caracterização dos Materiais de Referência

Os materiais que serão descritos a seguir foram utilizados como referência por já terem apresentado resultados experimentais satisfatórios em concretos, e devido a essa condição, são utilizados frequentemente e possuem um adequado monitoramento e controle de suas propriedades.

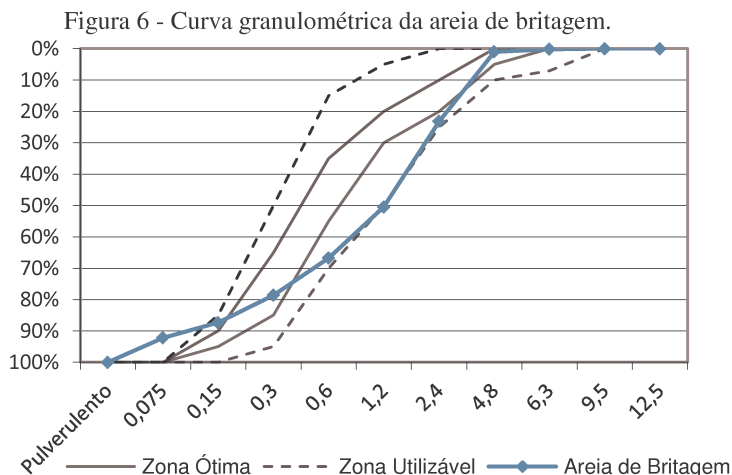
5.1.1.1 Areia Natural

A areia natural utilizada como referência no presente trabalho é de sílica, proveniente de dunas localizadas na região de Imbituba/SC, possui módulo de finura 1,000 e massa específica aparente igual a 2,66 kg/dm³. Sua curva granulométrica está exposta na Figura 5, a seguir.



5.1.1.2 Areia de Britagem

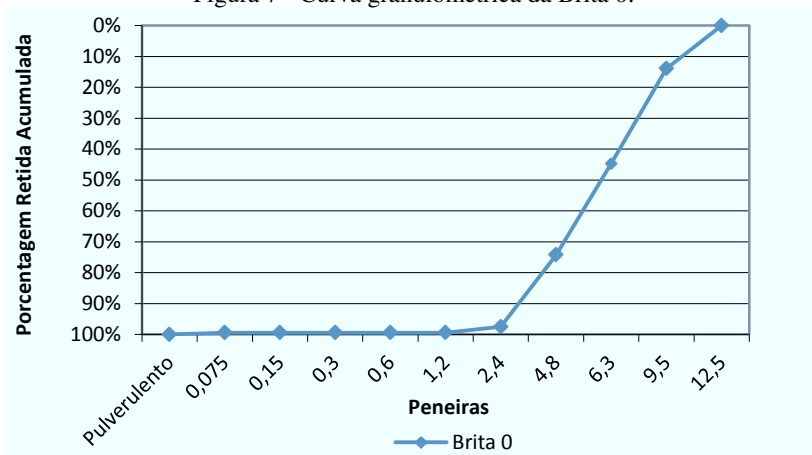
A areia de britagem referência para a realização dos ensaios descritos a seguir é proveniente da exploração de rocha granítica, localizada em Forquilha/SC. Apresenta módulo de finura 3,072 e massa específica aparente de $2,65 \text{ kg/dm}^3$. A Figura 6 demonstra a sua curva granulométrica.



5.1.1.3 Brita 0

A brita 0 utilizada como referência para a confecção dos concretos secos foi fornecida por uma empresa que possui sua pedreira localizada em Forquilha/SC. Esse agregado graúdo tem origem granítica e passou por três processos de britagem: britador de mandíbula (primário), britador cônico (secundário) e britador VSI (terciário), consecutivamente. Além disso, possui massa específica aparente de $2,67 \text{ kg/dm}^3$, módulo de finura 5,834 e sua curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 - Curva granulométrica da Brita 0.



5.1.1.4 Cimentos

Os cimentos utilizados no presente estudo foram o CP IV RS, para o emprego em concretos plásticos, e o CP V ARI RS, para emprego em concretos secos. As características físicas e químicas dos cimentos, fornecidas pelo fabricante, constam na Tabela 3, disposta a seguir.

Tabela 3 - Características físicas e químicas dos cimentos empregados.

Características	CP IV-RS	CP V ARI-RS
Retido #200 (%)	0,20	0,20
Retido #325 (%)	1,90	1,20
Blaine (cm ² /g)	4170	4960
Início de pega (min)	215	194
Fim de pega (min)	231	264
Expansão a quente (mm)	0,00	0,43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	15,5	22,2
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	25,6	32,0
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	30,5	36,0
Massa específica (kg/dm ³)	2,88	3,02
Perda ao fogo (%)	2,99	3,48
Resíduo Insolúvel (%)	27,10	9,70
MgO (%)	4,75	5,87
SO ₃ (%)	2,41	3,21

5.1.2 Caracterização Preliminar da Areia de Fundição

A areia de fundição empregada neste estudo, não é misturada a resinas fenólicas, mas utiliza a bentonita como aglutinante. É classificada como resíduo classe II-B (resíduos inertes, não perigosos), segundo os laudos dos ensaios realizados pela empresa fornecedora do material. Para a classificação da areia de fundição, conforme prevista na ABNT NBR 10004:2004, é necessária a realização de ensaios de lixiviação (conforme a ABNT NBR 10005:2004) e de solubilização (conforme a ABNT NBR 10006:2004).

Para o ensaio de lixiviação da areia de fundição de estudo, primeiramente foi determinado o pH da amostra, com o auxílio de um medidor de pH. O valor de pH da amostra foi de 6,497. Como o valor foi maior que 5,0, adicionou-se 3,5mL de HCl 1 N, e foram realizados os procedimentos seguintes de homogeneização, conforme a ABNT NBR 10005:2004. Posteriormente, foi determinado o pH da amostra com a adição de HCl, cujo valor foi de 1,249. Portanto, para a realização do ensaio de lixiviação, foi utilizada a solução de extração número 1, contendo 5,7 mL de ácido acético glacial, 64,3 mL de NaOH 1,0 N e água preparada conforme cita a norma.

O ensaio foi realizado com a amostra de areia de fundição em duplicata. Foram utilizados dois recipientes padronizados, que foram submetidos à ação de um agitador rotatório de frasco, durante 18 horas.

Finalmente, após 18 horas, o agitador rotatório foi desligado e foram realizados os procedimentos para determinação das concentrações dos contaminantes presentes nas amostras. Os resultados são apresentados na Tabela 4, assim como os valores limites máximos de contaminantes no extrato, prescritos na ABNT NBR 10004:2004.

Como a concentração de cádmio presente na areia de fundição é maior do que o limite estabelecido para o extrato obtido no ensaio de lixiviação, segundo a ABNT NBR 10004:2004, a areia de fundição de estudo é classificada como resíduo classe I, perigoso, diferentemente da classificação fornecida pelo fabricante.

Tabela 4 - Contaminantes determinados através do ensaio de lixiviação.

Contaminantes	Teor (mg/L)		Limite NBR 10004 (mg/L)
	Amostra 1	Amostra 2	
Cálcio	62,745	104,521	Não consta
Cobre	36,289	34,575	Não consta
Ferro	24,223	36,023	Não consta
Cádmio	14,377	12,019	0,5
Zinco	14,054	13,080	Não consta
Estrôncio	7,591	7,696	Não consta
Níquel	7,368	0,000	Não consta

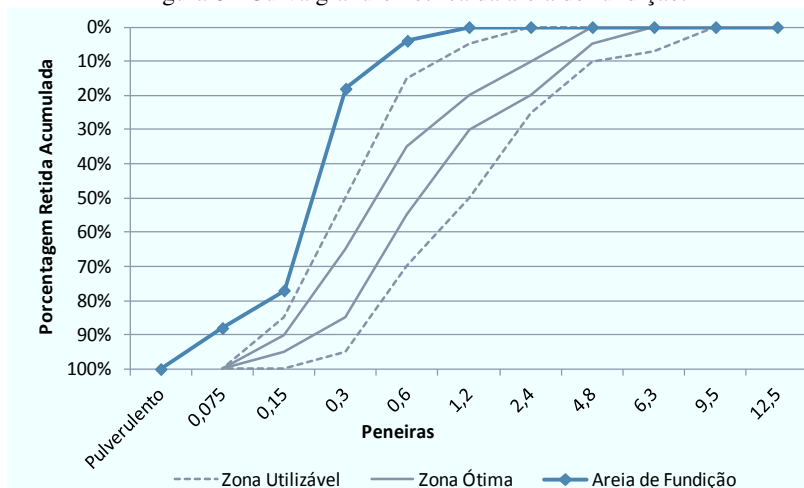
Visto que a areia de fundição foi classificada como resíduo classe I, não se fez necessária a realização do ensaio de solubilização.

Na Tabela 5, é apresentada a caracterização das propriedades da areia de fundição, e na Figura 8 se encontra a curva granulométrica da mesma, assim como os limites das zonas ótima e utilizável, prescritos na ABNT NBR 7211:2009. A determinação da composição granulométrica da areia de fundição foi realizada conforme a ABNT NBR NM 248:2003.

Tabela 5 - Caracterização da areia de fundição.

Propriedade	Norma	Valor
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 6508 (1984)	2,54
Massa Unitária (kg/dm ³)	NBR NM 45 (2006)	1,39
Módulo de Finura	NBR 7211 (2009)	1,00
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (2003)	11,87
Perda ao Fogo a 980°C (%)	NBR 10178 (1988)	3,52

Figura 8 - Curva granulométrica da areia de fundição.



5.2 METODOLOGIA

Com o intuito de avaliar o desempenho da areia de fundição em seus possíveis empregos, foram elaborados os métodos e realizados os ensaios descritos a seguir, expostos em duas seções em decorrência das duas aplicações estudadas.

5.2.1 Emprego da Areia de Fundição em Concretos Plásticos

Para a avaliação da qualidade da areia de fundição empregada na confecção de concretos plásticos, foi tomada a decisão de realizar este estudo a partir da confecção de argamassas, com o intuito de evidenciar os efeitos causados por esse resíduo em comparação à areia natural referência. Foram dosadas três argamassas com traço 1 : 3 : 0,55 : 0,5% (cimento : agregado miúdo : água : aditivo polifuncional). O cimento utilizado nas misturas é o CP IV RS e a parcela de agregado miúdo é composta por 60% de areia de britagem e 40% de areia fina, em massa. As três argamassas se diferem quanto à porcentagem de areia de fundição presente dentro da fração de areia fina, da seguinte forma:

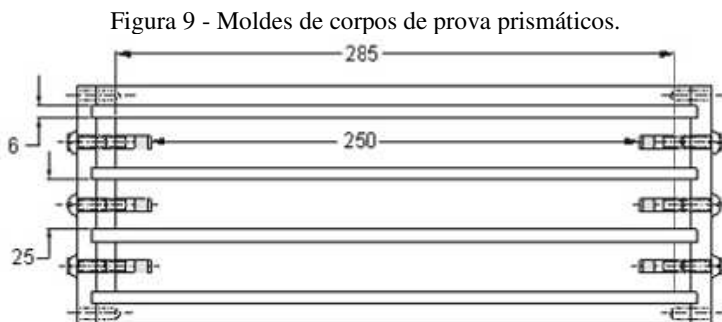
- Argamassa 1: Argamassa de referência. Dosada com 40% de areia natural utilizada atualmente pelas usinas de concreto da região de Florianópolis. Tal areia apresenta desempenho

satisfatório quando utilizada em concretos e argamassas, possuindo o mesmo módulo de finura da areia de fundição e massa específica de $2,64 \text{ g/cm}^3$;

- Argamassa 2: Argamassa com 20% de areia natural e 20% de areia de fundição, representando 50% de areia de fundição dentro da quantidade total de areia fina;
- Argamassa 3: Argamassa com 40% de areia de fundição, representando 100% de areia de fundição dentro da quantidade de areia fina.

5.2.1.1 Moldagem dos Corpos de Prova Prismáticos

Foram moldados seis corpos de prova prismáticos de $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$ visando o ensaio de variações volumétricas. Utilizou-se 100% de areia de fundição em substituição à areia natural fina em três corpos de prova, enquanto que nos outros três não se utilizou a areia de fundição, e sim a areia natural fina (corpos de prova referências). Para a moldagem, foram utilizados moldes prismáticos normatizados, conforme pode ser visualizado na Figura 9.



Fonte: NBR 15261 (2005).

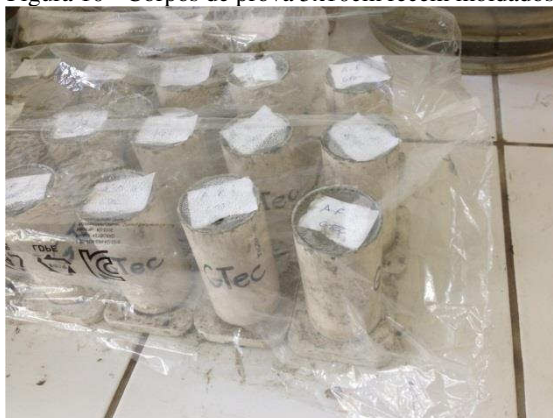
5.2.1.2 Moldagem dos Corpos de Prova Cilíndricos

Foram moldados dezoito corpos de prova cilíndricos de $5 \times 10 \text{ cm}$, seis para cada um dos traços previamente apresentados. Os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de PVC. A superfície interna dos moldes foi previamente untada com uma fina camada de óleo. A colocação de argamassa no molde foi feita em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo, cada uma das camadas, 12 golpes de espátula, homogeneamente distribuídos. Após os

golpes da última camada, foram aplicados leves golpes na superfície lateral dos moldes para a eliminação de vazios e então se procedeu com a regularização do topo dos corpos de prova de argamassa.

Finalizada a moldagem, os corpos de prova foram armazenados em sala climatizada por 48 horas, com a face superior protegida por um filme de PVC, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Corpos de prova 5x10cm recém moldados.



Terminado o período inicial de cura (48 horas), os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e imersos, separados entre si, em um tanque de água saturada de cal, onde permaneceram até a data de rompimento à compressão (7 ou 28 dias). Antes do rompimento, os corpos de prova foram capeados com pasta de cimento com o intuito de regularizar as superfícies que estariam em contato com os pratos da prensa hidráulica.

5.2.1.3 Ensaios

Os ensaios realizados com cada argamassa foram os seguintes:

- Verificação do índice de consistência: Após a preparação das argamassas, foi realizado o ensaio Flow Table test. Segundo a ABNT NBR 7215 (1996), o ensaio consiste em preencher uma forma troncônica padrão em três camadas de mesma altura e, com soquete normal, aplicar 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos, respectivamente, na primeira, segunda e terceira camada. Após essa operação, remove-se o

excesso de material no topo do conjunto e alisa-se a superfície. Terminado o processo de alisamento do topo, retira-se a forma, levantando-a verticalmente, e promove-se 30 quedas da mesa (mesa horizontal lisa e plana padronizada), aproximadamente uma queda por segundo. Posterior ao abatimento do tronco de cone de argamassa, com o auxílio de um paquímetro, mede-se o diâmetro da base do tronco de cone em duas direções ortogonais e se estabelece o índice de consistência da argamassa através da média aritmética das medidas dos dois diâmetros, em milímetros. Como os módulos de finura apresentados tanto pela areia de fundição quanto pela areia natural de referência são iguais, é possível analisar somente os valores de índice de consistência obtidos pelo ensaio Flow Table test, sem a necessidade de aplicação de um coeficiente que corrija a diferença de módulo de finura entre areias. A Figura 11 mostra as argamassas ensaiadas, após as 30 quedas da mesa padrão.

Figura 11 - Ensaio Flow Table test.



(a) Argamassa com 50% de areia de fundição.



(b) Argamassa com 100% de areia de fundição.

- Verificação do tempo de pega: Após a mistura, as argamassas foram colocadas em calorímetros semi-adiabáticos feitos de EPS para monitoramento da evolução de temperatura com o tempo. Com a utilização de um aquisitor de dados, foi possível realizar as leituras das temperaturas das argamassas, com um intervalo de tempo de 5 minutos entre as leituras, e assim estimar o tempo de pega das mesmas através de um critério de aumento de temperatura de $0,25^{\circ}\text{C}$ em 15 minutos (ou 1°C por

hora), sem taxas negativas de evolução de temperatura posteriores.

- Verificação das variações volumétricas: Foram feitas as medições dos comprimentos de corpos de prova prismáticos de argamassa de 25x25x285mm em diferentes idades, como previsto na ABNT NBR 15261 (2005). Para a medição da variação de comprimento dos corpos de prova, foi utilizado o aparelho comparador descrito na mesma norma. A variação dimensional foi calculada por meio da Equação 2:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo que:

ε_i - É a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva), na idade “i”, em milímetros por metro;

L_i - É a leitura efetuada na idade de estudo, em milímetros;

L_0 - É a leitura efetuada após a desforma, em milímetros;

i - É a idade de leitura.

- Resistência à compressão: Rompimento de corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm à compressão com 7 e 28 dias de idade, com a utilização da prensa hidráulica SHIMADZU. O cálculo da resistência à compressão é feito a partir da Equação 1, sendo que a carga máxima aplicada é medida com o auxílio da prensa hidráulica e a área da seção transversal dos corpos-de-prova equivale a 19,63cm².

5.2.1.4 Testes em Escala Industrial: Produção de Concreto Plástico

Não foram realizados testes em concreto plástico em escala real porque os resultados em laboratório não foram satisfatórios. Essa determinação será explanada no capítulo 6.

5.2.1.5 Testes com Areia de Fundação Queimada

Tendo em vista os resultados não satisfatórios das argamassas plásticas, que serão expostos e comentados no capítulo 6, foram

realizados novos estudos com uma alternativa de utilização da areia de fundição.

A areia de fundição convencional foi submetida a um tratamento térmico com o auxílio de um forno elétrico a 900°C, com o intuito de remover a parcela de carvão pulverizado nela presente. Após o tratamento térmico, a areia de fundição queimada apresentou propriedades ligeiramente diferentes da convencional: coloração marrom (Figura 12) e menor massa específica aparente (2,49kg/dm³).

Figura 12 - Areia de fundição queimada.



O traço utilizado nas misturas iniciais dos testes em argamassa foi alterado. A relação água/cimento passou a ser 0,52, devido à necessidade de adequação da trabalhabilidade da primeira argamassa realizada, que continha 50% de areia de fundição queimada em substituição à areia natural. Além disso, as quantidades em massa da nova areia de fundição eram diferentes da areia de fundição convencional do traço previamente utilizado. Essa mudança se deve à variação da massa específica aparente da areia de fundição queimada em relação à convencional, tendo em vista que as substituições foram feitas em volume.

Foram realizados ensaios de índice de consistência e resistência à compressão, para argamassas com 0, 50 e 100% de areia de fundição queimada em substituição à areia natural fina, seguindo os mesmos procedimentos de moldagem das misturas e de ensaios efetuados com as argamassas iniciais.

5.2.2 Emprego da Areia de Fundição em Concretos Secos para a Produção de Blocos

Objetivando a análise do desempenho da areia de fundição na produção de blocos de concreto, foram dosadas misturas com três traços: pobre, médio e rico. Todas as misturas continham brita 0 utilizada como agregado graúdo. As composições dos traços foram cedidas por uma empresa de pré-moldados e os traços dos concretos de referência (com areia natural fina) consistem em:

- Traço pobre ($m = 9,82$): 1 : 6,73 : 3,09 : 0,3% (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo : aditivo incorporador de ar);
- Traço médio ($m = 7,05$): 1 : 3,96 : 3,09 : 0,3%;
- Traço rico ($m = 5,00$): 1 : 2,72 : 2,28 : 0,3%.

As quantidades de agregados miúdos e graúdos de cada traço dos concretos de referência foram dimensionadas visando o teor de argamassa de 71%. Da quantidade total de agregados miúdos, 60% era areia de britagem e 40% de areia fina natural e/ou de fundição. O cimento utilizado foi o CP V ARI RS. A relação água/cimento foi ajustada durante a mistura com a finalidade de atingir a consistência adequada do concreto seco (“Ponto de pelota”), mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Consistência adequada do concreto seco.



Para cada um dos três traços foram dosadas três misturas, modificando a composição da areia fina, dispostas a seguir:

- Concreto 1: Concreto referência. Dosado com 40% de areia fina natural, dentro da quantidade total de agregado miúdo;
- Concreto 2: Concreto com 20% de areia de fundição e 20% areia natural;
- Concreto 3: Concreto com 40% de areia de fundição, tendo sido a areia natural totalmente substituída.

É importante salientar que todas as substituições da areia natural fina pela areia de fundição foram realizadas em volume e, dessa forma, alterando o teor de argamassa dos concretos 2 e 3 em massa, mas não em volume.

5.2.2.1 Moldagem dos Corpos de Prova em Concreto Seco

Foram moldados corpos de prova de 5x10cm, adensados e prensados por meio de golpes de um peso padrão, a fim de atingir a massa específica estipulada, para serem rompidos à compressão aos 28 dias de idade.

Os corpos de prova de traço pobre (1 : 9,82) foram moldados com massa específica de 2,20 kg/dm³, enquanto que as misturas mais ricas (1 : 7,05 e 1 : 5,00) foram moldadas com duas massas específicas: 2,20 kg/dm³ e 2,25 kg/dm³, visando à confecção de concretos com maior resistência mecânica.

5.2.2.2 Testes em Escala Industrial: Produção e Classificação dos Blocos de Concreto

Em posse dos resultados obtidos com os ensaios realizados em concreto seco, foi estabelecido que os blocos a serem confeccionados na fábrica de produção de blocos teriam baixa resistência, sendo as nominais de catálogo: 4 MPa e 6 MPa. Tal decisão se deve à reduzida variação de resistência, em relação à referência, apresentada pelos concretos secos de traço pobre contendo areia de fundição e pela expressiva redução de resistência observada dos demais traços contendo maior proporção de cimento. Os resultados apresentados pelos concretos secos serão abordados com maior ênfase no capítulo posterior.

Em visita à empresa, foram produzidos 24 blocos de concreto com os agregados já comumente utilizados, intitulados de “Blocos Comuns”, para servirem de comparação aos 24 blocos de concreto que possuem a sua parcela de areia natural fina alterada pela presença da

areia de fundição, moldados logo em seguida e intitulados de “Blocos Alterados”. A Figura 14 apresenta blocos de concreto recém-moldados.

Figura 14 - Produção dos blocos de concreto.



Dentro do grupo dos “Blocos Comuns”, 12 destes apresentam resistência de catálogo de 4 MPa, enquanto os 12 restantes têm suas resistências catalogadas em 6 MPa. A mesma divisão ocorre no grupo dos “Blocos Alterados”. Cabe salientar que todos os blocos foram devidamente identificados logo após as respectivas moldagens.

Os 12 blocos de concreto de cada categoria, após serem pesados e classificados em três diferentes faixas de peso (três leves, cinco médios e quatro pesados), foram capeados com pasta de cimento, para a regularização das superfícies que entrariam em contato com a prensa hidráulica e submetidos a ensaios laboratoriais de resistência à compressão (com os cinco blocos de peso mediano).

O rompimento dos blocos de concreto à compressão com 28 dias de idade foi realizado com a utilização da prensa hidráulica SHIMADZU. O cálculo da resistência à compressão é feito a partir da Equação 1, sendo que a carga máxima aplicada é medida com o auxílio da prensa hidráulica e a área bruta da seção transversal dos blocos de concreto equivale a 546 cm².

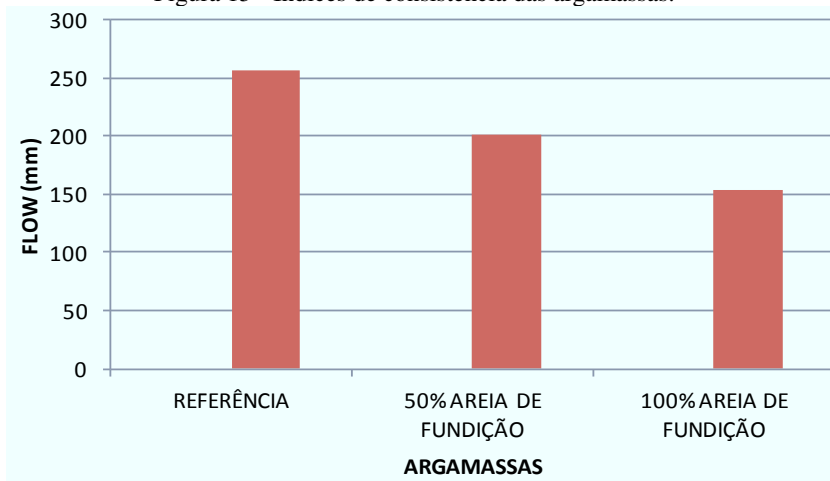
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos ensaios realizados para cada um dos dois empregos estudados para a areia de fundição, foram obtidos resultados que serão discutidos a seguir e que contribuirão para a análise de viabilidade.

6.1 ARGAMASSAS PLÁSTICAS PARA EMPREGO EM CONCRETO PLÁSTICO

Para o estudo das argamassas plásticas, foi realizado, no estado fresco, o Flow Table test para a medida do índice de consistência de todas as argamassas. Como a relação água/cimento estabelecida foi a mesma para as três argamassas e a areia de fundição e a natural empregada possuíam o mesmo módulo de finura, o maior índice de consistência (flow) indica uma areia que confere mais plasticidade à argamassa, e, portanto, que demandaria menos água na produção de concretos plásticos. Os resultados do Flow Table test estão apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Índices de consistência das argamassas.



Conforme a Figura 15, a argamassa 2, que contém 50% de areia de fundição em substituição à areia natural, apresentou índice de consistência de 200 mm, 20% inferior ao índice de consistência da argamassa 1, a referência. Já a argamassa 3, que possui 100% de areia

fundição dentro da parcela de areia fina do traço, apresentou índice de consistência de 150 mm, 40% inferior ao índice de consistência da argamassa de referência.

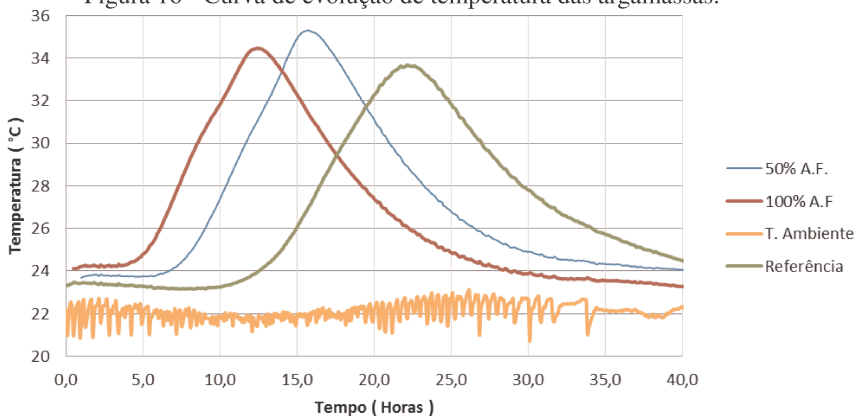
Esses resultados indicam que a areia de fundição demanda uma maior quantidade de água do que a areia natural comumente utilizada na região de Florianópolis, possivelmente pela presença de material fino argiloso, a bentonita. Isso implica em um maior consumo de cimento por m^3 de concreto para que se possa manter a mesma resistência à compressão da mistura e a mesma trabalhabilidade. Essa constatação está de acordo com outros estudos da areia de fundição: Siddique e Singh (2011) concluíram que a inclusão de resíduos de areia de fundição como substituição parcial de agregados finos diminui significativamente o abatimento do concreto (slump test).

Através do ensaio de verificação de tempo de pega, foi possível estimar o tempo de início de pega das argamassas com diferentes teores de areia de fundição. Os resultados estão expostos na Tabela 6 a seguir e a curva de evolução de temperatura é apresentada na Figura 16.

Tabela 6 - Estimativa de tempo de pega das argamassas.

Argamassa	Tempo (h)
Referência	13,8
50% A.F.	6,9
100% A.F.	4,9

Figura 16 - Curva de evolução de temperatura das argamassas.



Nota-se que, à medida que o teor utilizado de areia de fundição aumenta, a estimativa do tempo de pega das argamassas decresce. Esse comportamento pode ser explicado pela possível presença de substâncias no material bentonítico que contribuem para a aceleração do tempo de pega e que podem estar interferindo nas reações de hidratação do cimento.

Além disso, percebe-se que não há diferença considerável entre os picos de temperatura apresentados pelas diferentes argamassas.

Em relação às propriedades do estado endurecido, foram rompidos corpos de prova à compressão aos 7 e 28 dias de idade, cujas resistências são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Resistências à compressão das argamassas.

Argamassa	Resistência à Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Referência	34,27	41,81
50% A.F.	28,70	35,24
100% A.F.	14,72	18,59

O uso de 50% de areia de fundição reduziu a resistência à compressão em aproximadamente 16%, enquanto que o uso de 100% de areia de fundição em substituição à areia fina resultou em resistência à compressão 57% inferior à argamassa de referência, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de idade.

Quanto aos resultados com 28 dias dos ensaios de verificação das variações volumétricas em corpos de prova prismáticos de argamassa, diferentemente do esperado, não apontaram nenhuma expansão deletéria causada pela presença da areia de fundição. Assim como as argamassas de referência, as argamassas contendo areia de fundição também apresentaram retração, conforme visualizado na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 - Variações volumétricas das argamassas de referência.

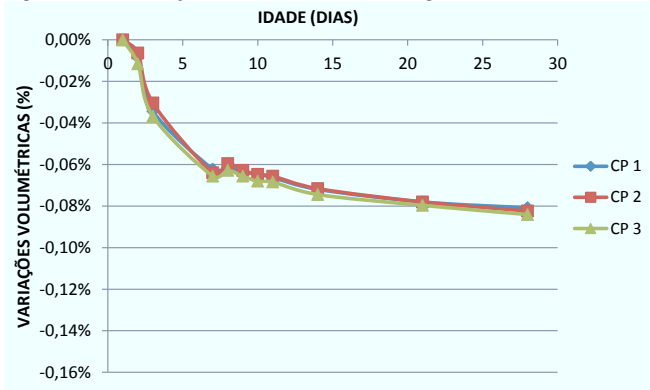
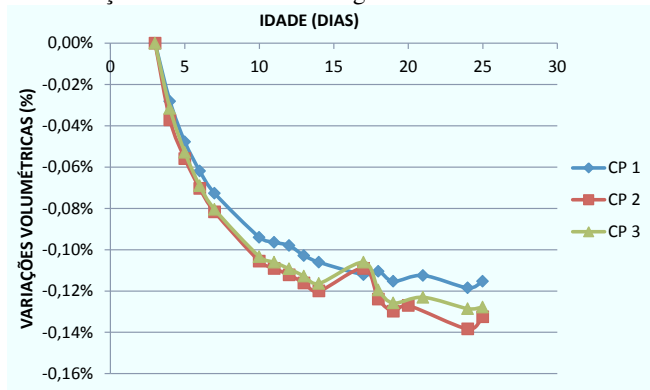


Figura 18 - Variações volumétricas das argamassas contendo areia de fundição.



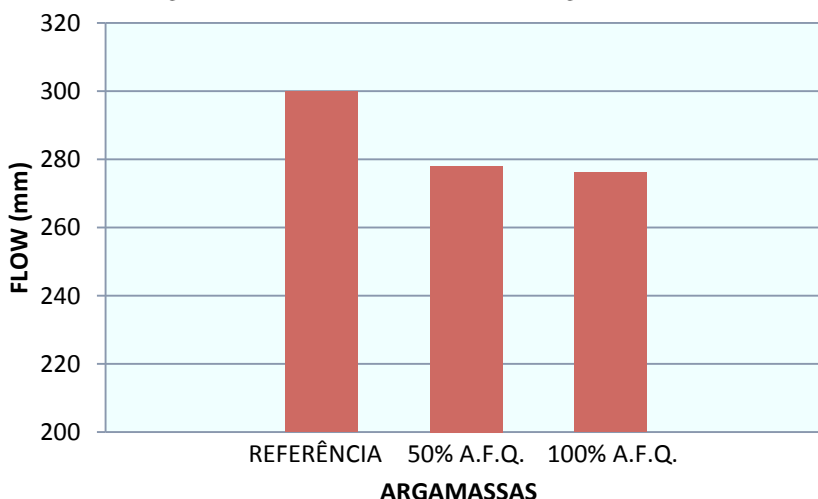
Os corpos de prova prismáticos contendo areia de fundição apresentaram retrações mais pronunciadas do que os de referência. Essas retrações podem ter causado microfissuras nos corpos de prova, contribuindo para a queda de resistência à compressão analisada.

Aliado a isso, suspeita-se que a diminuição de resistência à compressão dos corpos de prova moldados com areia de fundição, pode ter sido originada também na moldagem deficitária em função da menor trabalhabilidade que essas misturas apresentavam, resultando em uma menor massa específica, pelo aumento do teor de vazios presentes na amostra. Outra hipótese pode ser uma influência na hidratação do cimento por parte de substâncias presentes na argila bentonítica, uma vez que houve uma redução significativa no tempo de início de pega das argamassas em que se utilizou a areia de fundição.

Tendo em vista os resultados não satisfatórios apresentados pelas argamassas plásticas, foram realizados novos ensaios em argamassa com a areia de fundição queimada.

No estado fresco, foram mensurados os índices de consistência das argamassas através do Flow Table test. Como a relação água/cimento estabelecida para as misturas era a mesma e os módulos de finura da areia de fundição e da areia natural referência são iguais, pôde-se observar então a atuação dos diferentes teores de areia de fundição queimada presentes nas argamassas na trabalhabilidade das mesmas, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Índices de consistência das argamassas.



Percebe-se que, apesar da presença da areia de fundição queimada diminuir a trabalhabilidade das argamassas, essa diminuição foi menos acentuada do que a observada quando se utilizou areia de fundição convencional, sem o tratamento térmico. As reduções em relação à argamassa referência, respectivamente para as substituições de 50% e 100%, foram de 7 e 8%, o que não caracteriza grandes prejuízos proporcionados pela utilização desse resíduo.

Quanto à resistência à compressão das argamassas contendo areia de fundição queimada, foi visualizada uma melhoria significativa em relação aos primeiros testes com a areia de fundição convencional. Os corpos-de-prova foram rompidos aos 7 dias e aos 28 dias de idade, e os resultados estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Resistências à compressão das argamassas.

Argamassa	Resistência à Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Referência	28,0	39,8
50% A.F.Q.	27,8	37,8
100% A.F.Q.	27,6	41,5

Nota-se que os resultados de resistência à compressão de todas as argamassas apresentaram valores muito próximos para diferentes teores de areia de fundição queimada.

A hipótese de que a parcela de carvão pulverizado contida na areia de fundição convencional estava prejudicando a hidratação do cimento e, conseqüentemente, influenciando no desenvolvimento de resistência das argamassas, pôde ser validada, tendo em vista as resistências à compressão atingidas. Eliminando esse material deletério da areia de fundição, as argamassas que a continham foram condicionadas a alcançar resistências similares à argamassa referência.

Vale salientar que não foram testadas diferentes temperaturas de queima e, talvez, não seja necessária uma energia tão elevada (900°C) para proporcionar os benefícios observados.

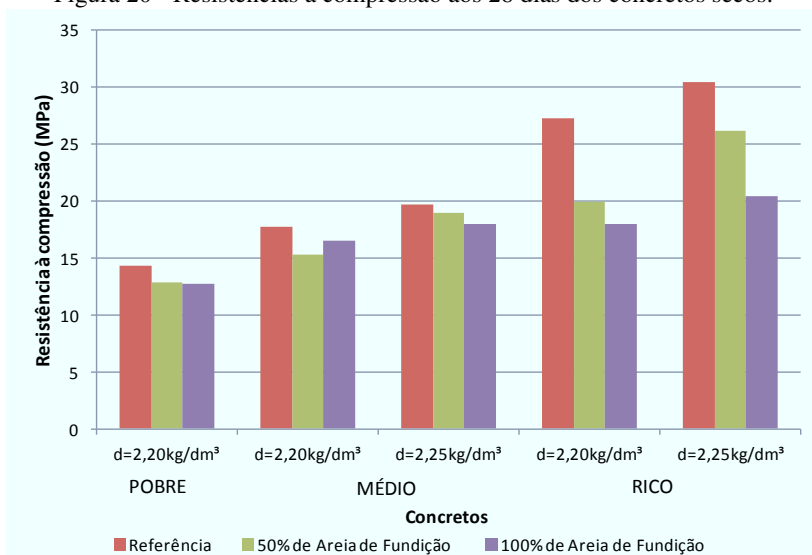
6.2 EMPREGO EM CONCRETOS SECOS PARA A PRODUÇÃO DE BLOCOS

Para o estudo da areia de fundição aplicada em concretos secos, foi realizado, no estado endurecido, o ensaio de resistência à compressão de corpos de prova aos 28 dias de idade. Os resultados podem ser observados na Tabela 9 e na Figura 20.

Tabela 9 - Resistências à compressão aos 28 dias, em MPa.

Traço	Pobre		Médio		Rico	
Concreto / Massa Específica (kg/dm ³)	2,20	2,20	2,25	2,20	2,25	
Referência	14,36	17,77	19,76	27,30	30,46	
50% Areia de Fundição	12,90	15,36	18,97	19,91	26,18	
100% Areia de Fundição	12,78	16,55	18,00	17,95	20,47	

Figura 20 - Resistências à compressão aos 28 dias dos concretos secos.



A partir dos resultados expostos, pode-se notar que os concretos secos contendo areia de fundição em traço pobre não apresentaram diferença significativa na resistência à compressão com relação ao concreto seco de referência (redução de aproximadamente 10%). Entretanto, à medida que se aumenta a classe de resistência do concreto, as quedas de resistência se tornam cada vez mais expressivas com o uso da areia de fundição. No traço médio com massa específica de 2,20 kg/dm³, a substituição total de areia fina causou uma diminuição de resistência na ordem de 7%, e com massa específica de 2,25 kg/dm³ a redução foi de 9%. Nos concretos ricos essa redução foi mais pronunciada, sendo de 34% na menor massa específica e de 33% na maior massa específica, com substituição total da areia natural fina, e de 27% e 14%, respectivamente, para os corpos de prova com massa específica de 2,20 e 2,25 kg/dm³ contendo 50% de areia de fundição em substituição à areia natural fina.

Tendo em vista que a produção de blocos de baixa resistência à compressão poderia ser uma alternativa viável do uso da areia de fundição, foram moldados blocos de resistência nominais de catálogo de 4 MPa e 6 MPa com substituição total da areia fina pela areia de fundição e sem a presença de areia de fundição. Os resultados obtidos

do ensaio de resistência à compressão dos blocos de concreto estão apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11 dispostas a seguir:

Tabela 10 - Resistência à compressão dos "Blocos Comuns" aos 28 dias de idade.

Blocos Comuns					
4 MPa			6 MPa		
Peso (g)	Resist. Líquida (MPa)	Resist. Bruta (MPa)	Peso (g)	Resist. Líquida (MPa)	Resist. Bruta (MPa)
13090	14,33	7,27	13640	18,25	9,26
13065	14,22	7,22	13730	19,62	9,95
13010	13,52	6,86	13700	18,56	9,41
13010	14,58	7,40	13690	18,72	9,50
12980	14,19	7,20	13520	19,17	9,73
Resultado Médio			Resultado Médio		
13031	14,17	7,19	13656	18,86	9,57

Tabela 11 - Resistência à compressão dos "Blocos Alterados" aos 28 dias de idade.

Blocos Alterados					
4 MPa			6 MPa		
Peso (g)	Resist. Líquida (MPa)	Resist. Bruta (MPa)	Peso (g)	Resist. Líquida (MPa)	Resist. Bruta (MPa)
13495	12,27	6,23	13625	17,58	8,92
13330	10,40	5,27	13335	16,52	8,38
13340	11,25	5,71	13500	16,35	8,30
13330	10,79	5,47	13560	16,81	8,53
13190	9,95	5,05	13350	16,30	8,27
Resultado Médio			Resultado Médio		
13337	10,93	5,55	13474	16,71	8,48

Percebe-se que houve uma queda de resistência à compressão dos blocos com areia de fundição quando comparados aos blocos

referências, para ambas as classes de resistência analisadas. Entretanto, a diminuição da resistência observada não é significativa a ponto de qualificar a areia de fundição como um resíduo cuja utilização em blocos de concreto seja inviável. As reduções médias de resistência à compressão dos “blocos alterados” em relação aos “blocos comuns” foram de 23% e de 11% para os blocos de resistências características de catálogo 4 e 6 MPa, respectivamente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da realização do programa experimental deste trabalho, foram obtidos resultados do uso da areia de fundição como agregado miúdo fino para duas aplicações em concretos: concretos plásticos e concretos secos.

Com os resultados dos ensaios realizados, pode-se constatar que a areia de fundição estudada não é recomendada para concretos plásticos sem que antes seja submetida a um tratamento térmico para a retirada do material deletério nela presente. Caso esse procedimento não seja efetuado, a presença da areia de fundição provocará uma diminuição gradativa na resistência à compressão de concretos à medida que o teor de substituição da areia natural fina pela areia de fundição aumenta, para uma mesma relação água/cimento.

Além disso, observou-se uma diminuição significativa na trabalhabilidade das misturas. A areia de fundição tende a demandar mais água do que a areia natural fina empregada.

Por outro lado, o tratamento térmico proporcionou uma melhoria na resistência à compressão das argamassas e ocasionou a diminuição da exigência de água em relação ao estudo inicial, com a areia de fundição convencional.

Os resultados satisfatórios observados demonstram que esse resíduo pode ser encarado como um agregado alternativo com grande potencial para a confecção de concretos plásticos.

Para emprego em concretos secos, observou-se que o uso da areia de fundição não causa variações de comportamento consideráveis para baixas classes de resistência nominal, como blocos de concretos de 4 e 6 MPa (valor em área bruta). No entanto, para unidades de maior resistência, é esperada uma redução significativa na resistência do material.

Tendo em vista os resultados apresentados de resistência à compressão dos blocos de concreto de resistências nominais de catálogo de 4 e 6 MPa, produzidos em fábrica de pré-moldados, pode-se concluir que as reduções de resistência mecânica observadas são ligeiramente maiores do que as reduções previstas em corpos de prova. Entretanto, essa diferença apresentada não é um fator que inviabiliza a utilização desse resíduo na fabricação de blocos de concreto, visto que os resultados de resistência à compressão desses artefatos ainda se situam acima das resistências nominais de catálogo.

Desta forma, a substituição de areia natural fina por areia de fundição é considerada viável tanto para concretos plásticos (desde que

submetida a tratamento térmico prévio) quanto para concretos secos, embora possa ser necessário um acréscimo no consumo de cimento das misturas, devido à maior demanda de água causada pela presença desse resíduo sólido.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de pesquisas que podem contribuir com o estudo de viabilidade da utilização de areia de fundição em concretos, são expostas a seguir.

- Repetição do ensaio de lixiviação, segundo a ABNT NBR 10005:2004, para certificação da classificação da areia de fundição, conforme a ABNT NBR 10004:2004;
- Ensaio de lixiviação para amostras de concreto com areia de fundição, com a finalidade de verificar a possível neutralização dos contaminantes nela presentes;
- Ensaio de lixiviação com areia de fundição queimada;
- Recomenda-se estudar a quantidade de calor ideal necessária para a queima dos materiais nocivos ao concreto plástico presentes na areia de fundição estudada, promovendo, dessa maneira, um menor consumo de energia no tratamento térmico do resíduo, resultando na otimização desse processo;
- Realização de teste em concreto plástico com areia de fundição queimada;
- Realização de testes em concreto seco com areia de fundição queimada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIFA: **Associação Brasileira de Fundição**. Disponível em < <http://www.abifa.org.br>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7215**: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10005**: Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10006**: Solubilização de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10178**: Materiais de fundição – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

CETESB: **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental**. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>.

ISAIA, G. C. (Ed.). **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005, v-1.

JI, S.; WAN, L.; FAN, Z. **The toxic compounds and leaching characteristics of spent foundry sands**. Water, Air, and Soil Pollution, Volume 32, Pages 347-364, 2001.

MACCAGNAN, B.; PELIZZARI, P.M.; DRUCK, F.; PAGNUSSAT, D.T. **Otimização do proporcionamento de areias de fundição incorporadas na fabricação de blocos de concreto**. In: Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto. Gramado, RS, 2013.

MATOS, S. V.; SCHALCH, V. **Alternativas de minimização de resíduos da indústria de fundição**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador e. Giammusso. 2. Ed, São Paulo: Pini, 1997.

PEIXOTO, F. **Regeneração térmica de areia ligada quimicamente**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.

SIDDIQUE, R.; AGGARWAL, Y.; AGGARWAL, P.; KADRI, E.; BENNACER, R. **Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS)**. Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 4, April 2011, Pages 1916-1925, ISSN 0950-0618.

SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR, A. **Waste foundry sand and its leachate characteristics**. Resources, Conservation and Recycling, Volume 54, Issue 11, 2010, Pages 1027-1036, ISSN 0921-3449.

SIDDIQUE, R.; NOUMOWE, A. **Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete**. Resources, Conservation and Recycling, Volume 53, Issues 1–2, December 2008, Pages 27-35, ISSN 0921-3449.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G.; NOUMOWE, A. **Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete**. Construction and Building Materials, Volume 23, 2009, Pages 976-980, ISSN 0950-0618.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. **Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing**. Resources, Conservation and Recycling, Volume 55, Issue 11, September 2011, Pages 885-892, ISSN 0921-3449.

VENÂNCIO, C. **Avaliação das propriedades elétricas de matrizes cimentícias contendo metais pesados**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.